

Оценка показателей работ беспилотных мультикоптеров по внесению пестицидов и агрохимикатов

Валерий Павлович Асовский¹,
доктор технических наук, ученый секретарь,
e-mail: asovsky@panh.ru;
Алла Сергеевна Кузьменко²,
кандидат технических наук, старший преподаватель;

Олег Владимирович Худоленко¹,
доктор технических наук,
заместитель генерального директора,
e-mail: khudolenko@panh.ru

¹Научно-производственная компания «ПАНХ», г. Краснодар, Российская Федерация;

²Южный Федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация

Реферат. Рассмотрели использование беспилотных воздушных судов как одно из перспективных инновационных направлений развития отраслей экономики и социальной сферы. Показали перспективы их применения в сельском хозяйстве, особенно для внесения пестицидов и агрохимикатов, где важны точность, качество и своевременность. Отметили актуальность оценки работы мультикоптеров. (*Цель исследований*) Разработать и апробировать методику оценки показателей выполнения мультикоптерами работы по внесению пестицидов и агрохимикатов в сельскохозяйственном производстве. (*Материалы и методы*) Использовали научно-техническую информацию и экспериментальные материалы, а также методы системного, статистического и функционально-стоимостного анализа, математического моделирования и оптимизации параметров объектов и процессов, применяя отработанные ранее методические подходы изучения авиационного распределения веществ. (*Результаты и обсуждение*) Представили общее описание и содержание разработанной методики и средств оценки показателей мультикоптеров при внесении рабочих растворов, обеспечивающих погрешность оценки до 7 процентов. Выделили типовые варианты участков и выполнения их обработки. Изучили результаты апробации методики и программных средств для характерного гексакоптера с полезной нагрузкой до 10 килограммов. Проанализировали влияние на производительность и себестоимость обработок мультикоптером рабочей скорости до 10 метров в секунду, норм внесения 2-30 литров на гектар, размеров и параметров участка до 200 гектаров, схем движения и других факторов. (*Выводы*) Подтвердили работоспособность методики комплексной многофакторной оценки показателей работ мультикоптеров по внесению рабочих жидкостей в сельскохозяйственном производстве. Определили рациональную область применения мультикоптеров с полезной нагрузкой до 10 килограммов на участках до 50-60 гектаров при длине гона до 800-900 метров при различной производительности обработок: летной – до 10,5 гектара в летный час, рабочей – до 7,5 гектара в час, дневной – до 55 гектаров. Сформулировали предложения и рекомендации по обеспечению, организации и выполнению этих работ.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, мультикоптер, внесение агрохимикатов, участок поля, авиационная обработка растений, авиационно-химические работы, норма внесения, себестоимость обработки.

Для цитирования: Асовский В.П., Кузьменко А.С., Худоленко О.В. Оценка показателей работ беспилотных мультикоптеров по внесению пестицидов и агрохимикатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 55-62. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-55-62.

Evaluation of Unmanned Multicopters' Performance Indicators for Pesticide and Agrochemical Application

Valery P. Asovskiy¹,
Dr.Sc.(Eng.), scientific secretary,
e-mail: asovsky@panh.ru;
Alla S. Kuzmenko²,
Ph.D.(Eng.), senior lecturer, e-mail: all7212@mail.ru;

Oleg V.Khudolenko¹,
Dr.Sc.(Eng.), deputy general director,
e-mail: khudolenko@panh.ru

¹PANH Helicopters, Krasnodar, Russian Federation;

²Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

Abstract. The authors considered the use of unmanned aerial vehicles as one of the promising innovative directions for the development of economic and social sectors. The authors touched upon the prospects for their use in agriculture, especially for pesticide and agrochemical application, where accuracy, quality and timeliness are important. The relevance of multicopter performance assessment was noted. (*Research purpose*) The authors aim to develop and test a methodology for the evaluation of multicopters' performance indicators for pesticide and

agrochemical application in the agricultural industry. (*Materials and methods*) The authors used scientific and technical information and experimental materials, applied methods of system, statistical and functional-cost analysis, mathematical modeling, object and process parameter optimization, as well as previously developed methodological approaches to studying the aerial distribution of substances. (*Results and discussion*) The authors presented a general description and content of the developed methodology and means for assessing multicopter performance when applying working solutions that provide for an estimation error of up to 7 percent. The typical options for field plots and their treatment were specified. The authors analyzed the results of testing the methodology and software for a typical hexacopter with the payload of up to 10 kilograms. The authors analyzed the impact of working speed of up to 10 meters per second, application rates of 2-30 liters per hectare, the size and characteristics of the field plot up to 200 hectares, traffic patterns and other factors on productivity and multicopter treatment cost. (*Conclusions*) The authors confirmed the efficiency of implementing complex multi-factor assessment of multicopter performance indicators for working fluids application in agricultural production. The authors determined the appropriate area of applying multicopters with a payload of up to 10 kilograms in the field plots up to 50-60 hectares with a rut length of up to 800-900 meters with different treatment performance: flight – up to 10.5 hectares per flight hour, working – up to 7.5 hectares per hour, daytime – up to 55 hectares. Proposals and recommendations for the provision, organization and implementation of this work were formulated.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), multicopter, application of agrochemicals, field plot, agricultural aerial spraying, aeronautical and chemical works, application rate, treatment prime cost.

For citation: Asovskiy V.P., Kuzmenko A.S., Khudolenko O.V. Otsenka pokazateley rabot bespilotnykh mul'tikopteroov po vneseniyu pestitsidov i agrokhimikatoov [Evaluation of unmanned multicopters' performance indicators for pesticide and agrochemical application]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 55-62 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-55-62.

Использование беспилотных воздушных судов (БВС) рассматривают как одно из наиболее значимых и перспективных инновационных направлений развития отраслей экономики и социальной сферы во многих странах мира. Применение БВС в сельском хозяйстве повышает его результативность, эффективность, экологичность и безопасность [1-4]. Основной областью их применения на сегодняшний день считается целевой мониторинг и различные виды съемок сельскохозяйственных угодий, в том числе в системе точного земледелия [2-5]. Технические и технологические решения разнообразных видов съемок не связаны напрямую с повышением продуктивности и эффективности сельскохозяйственного производства, однако они составляют информационную основу для проведения работ, непосредственно влияющих на эти показатели [2, 3, 6]. БВС могут обеспечить точность, качество и своевременность внесения необходимых веществ, повышая тем самым урожайность и снижая потери урожая сельскохозяйственных культур [3-7]. Для практического применения в агропромышленном комплексе, особенно для обработок сельскохозяйственных угодий, наиболее перспективны легкие БВС вертолетного типа – мультикоптеры (МК) с электрическим приводом. Для них характерны рациональное сочетание массовой отдачи, длительности полета, летных данных и экономических показателей [1, 3, 5, 6].

К сожалению, вопросам выполнения работ МК по внесению пестицидов и агрохимикатов уделяют недостаточно внимания: в основном рассматривают технические проблемы облика, оснащения и режимов полета [1, 5, 8-10], а также общие вопросы и положения применения БВС для внесения жидких и сыпучих веществ [6, 7, 11]. В информации производителей БВС и в научных работах практически отсутствуют сведения и ре-

зультаты исследований по оценке показателей выполнения БВС авиационно-химических работ (АХР) по внесению пестицидов и агрохимикатов. Именно это показатели, в частности рациональные технологические параметры, производительность и себестоимость обработок, в первую очередь интересуют потенциальных эксплуатантов сельскохозяйственных БВС и потребителей их услуг. Отсутствие этих данных сдерживает развитие применения БВС (МК) в сельском хозяйстве.

Цель исследований – разработать и апробировать методику оценки показателей выполнения мультикоптерами работ по внесению пестицидов и агрохимикатов в сельскохозяйственном производстве.

Материалы и методы. Исследования проводили на базе имеющейся научно-технической информации и полученных экспериментальных материалов с использованием методов системного, статистического и функционально-стоимостного анализа, математического моделирования и оптимизации параметров физических объектов и целевых процессов и применением отработанных ранее методических подходов изучения авиационного распределения веществ [12].

Результаты и обсуждение. В ходе исследований была разработана методика оценки показателей выполнения мультикоптерами работ по внесению агрохимикатов и реализующие ее расчетно-программные средства, учитывающие особенности условий, обеспечения и организации выполнения работ. В состав расчетно-программного комплекса входит набор взаимосвязанных блоков (модулей), обеспечивающих оценку разнообразных значимых единичных и комплексных показателей МК и процессов внесения агрохимикатов методом опрыскивания, а также совокупность интегральных показателей производства этих работ на основании обличковых параметров МК (взлетная масса, количество и диаметр не-

сущих винтов и т.д.). Модуль оценки массово-геометрических характеристик МК основан на поэлементном подходе и предусматривает расчет каркасных элементов конструкции (ферма, шасси и т.д.) и узлов крепления с использованием методов сопротивления материалов для условий полета с учетом коэффициентов безопасности, а также основных элементов обеспечения и управления полетом (электродвигатели, винты, регуляторы и т.д.) с применением полученных ранее статистических выражений. Результаты расчетов этого блока позволяют оценить массу конструкции МК с погрешностью в пределах $\pm 5\%$, сопоставимой с аналогичными известными методиками [1, 10, 13]. В дальнейшем ее учитывают совместно с массой опрыскивателя и аккумуляторных батарей (АБ) при расчете полезной загрузки.

Блок расчета аэродинамических характеристик и летных данных МК базируется на известной методике Л.С. Вильдгрубе [14]. Он предусматривает расчет вспомогательных характеристик (эквивалентная вредная пластинка, нагрузка на несущие винты и т.д.) и определение потребных для полета мощностей. С учетом параметров мультикоптера и показателей его АБ можно с погрешностью до 7% оценить его значимые и предельные летные данные (характерные скорости, время полета, маневренные показатели и т.д.) и энергопотребление при полетах по внесению агрохимикатов.

Модуль оценки показателей подачи, выпуска и распределения рабочей жидкости при выполнении заданного вида работ на принятой высоте и скорости полета МК предназначен для определения рабочей ширины захвата (перехода) обработок и уточнения параметров функционирования опрыскивателя (расход жидкости, степень ее диспергирования, энергопотребление и т.д.) по обеспечению требований производства АХР с учетом типа и количества используемых на БВС распылителей. Блок моделирования летного и рабочего цикла обработок МК участков заданной конфигурации построен на пооперационном подходе и обеспечивает детальную оценку показателей основных и вспомогательных полетных и наземных процессов обработок (времени, количества, выработки рабочей жидкости и емкости АБ и т.д.) с учетом принятой схемы и организации полетов МК, что позволяет определить комплексные показатели обработки, например производительность работ с заданными параметрами.

Модуль расчета технико-экономических показателей АХР для заданного варианта МК основан на отработанных ранее методических подходах [12, 15]. Он предусматривает оценку абсолютных и относительных затрат применения БВС при выполнении соответствующих работ для текущих общеэкономических условий (валютный курс, уровень оплаты труда, ставки налогообложения и страхования и т.д.) и осредненного распределения метеорологических данных в характерный период проведения АХР. При расчетах учитывают технологические и организационно-тех-

нические параметры выполнения работ. В качестве основных вариантов конфигурации участков, описываемых сторонами L и B , площадью $F = L \cdot B$ и коэффициентом удлинения $K_f = L/B$, и выполнения полетов МК при их обработке для проведения расчетов выделены соответствующие типовые схемы (рис. 1). Наиболее удобен и безопасен для обработки открытый участок, не имеющий препятствий (лесополос, кустарников, валков и т.д.) для полета на своих границах, то есть $K_{\Pi} = 0$ (рис. 1a). Опрыскивание проводится в его пределах на прямолинейных гонах с постоянной рабочей высотой H_p и скоростью V_p полета при непрерывном выпуске рабочего раствора (толстые линии) и расстоянии перехода Z_p . Развороты на следующий гон осуществляются с выключенным опрыскивателем – вне обрабатываемого участка (тонкие линии).

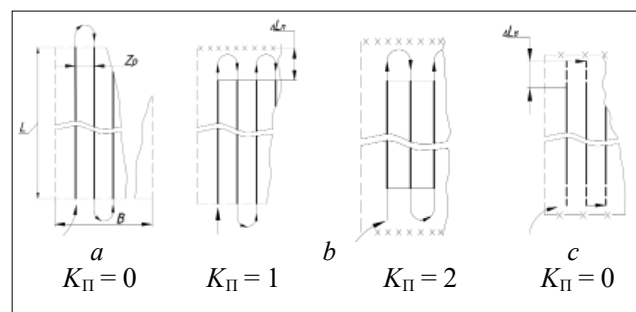


Рис. 1. Типовые схемы обработки участков мультикоптерами: а – открытый участок; б – участки с препятствиями; в – закрытая обработка (K_{Π} – наличие препятствий на границах участка, L и B – длина и ширина участка, Z_p – расстояние перехода, ΔL_{Π} и ΔL_B – отступы от линии препятствия (границы участка) при отключении и изменении подачи

Fig. 1. Typical diagrams for the multicopter treatments of field plots: a – open area; b – a plot with obstacles; c – closed processing (K_{Π} – the presence of obstacles on the plot boundaries, L and B – plot length and width, Z_p – transition distance, ΔL_{Π} and ΔL_B – margins from the obstacle line (plot boundaries) when switching off and changing the feed)

Участки с одним ($K_{\Pi} = 1$) или двумя ($K_{\Pi} = 2$) препятствиями по линии полета МК при обработке предполагают установившееся опрыскивание лишь в пределах возможного гона $L_{\Gamma} = L - K_{\Pi} \cdot \Delta L_{\Pi}$ с выключением опрыскивателя на удалении ΔL_{Π} от препятствия (рис. 1b). В этом случае участок обрабатывается неполностью (коэффициент покрытия $K_S \approx L_{\Gamma}/L < 1$), что создает определенные сложности для заказчика обработок.

Закрытая обработка ($K_{\Pi} = 0$) участков с препятствиями и без них осуществляется в границах участка (рис. 1c). При этом основная часть опрыскивания проводится в установившемся режиме, а приграничная зона обрабатывается при изменении на пути ΔL_B скорости полета на гоне в пределах $[0; V_p]$ и соответствующем изменении выпуска жидкости для обеспечения требуемой нормы внесения (толстая прерывистая линия) с последующим переходом к следующему гону. Для этого варианта, как и для обработки открытых

участков, коэффициент покрытия $K_S \approx 1$, что определяет его перспективность при условии решения вопросов обеспечения качества и эффективности опрыскивания в зоне переходных режимов общей площадью $2\Delta L_B \cdot B$. В России и за рубежом наиболее распространены для внесения пестицидов и агрохимикатов легкие МК с полезной нагрузкой около 10 кг и максимальной взлетной массой до 30 кг, что не требует обязательной сертификации БВС по действующему воздушному законодательству РФ и тем самым снижает потенциальную себестоимость их применения. В этой связи проведем оценку показателей выполнения МК обработок с использованием разработанных методики и расчетно-программных средств на примере характерного для отмеченного класса БВС гексакоптера *ODONATA* (рис. 2). Его максимальная взлетная масса равна 24 кг (на АХР – 22,5 кг), полезная нагрузка – до 10 кг. Имеются две 6S литий-полимерные АБ базовой емкостью по 16 А·ч (355 Вт·ч). Штанговый опрыскиватель оснащен 4 щелевыми форсунками. Максимальный выпуск жидкости – 3,2 л/мин. Рабочая бригада представлена оператором и техником. Для перебазирования БВС потребуется автомобиль типа ГАЗ-3301. Необходимо предусмотреть запас АБ на полную рабочую смену с учетом времени их оперативной подзарядки генератором. В качестве примера рассмотрим влияние рабочей скорости полета на производительность при обработке базовым МК квадратного ($K_f = 1$) участка площадью 4 га при наличии препятствий ($K_{\Pi} = 2$) с нормой внесения $H = 5$ л/га в ходе выполнении полетов с площадки непосредственно на границе участка – удаление $d_L = 0$ (рис. 3). При такой обработке наивысшая летная (кривая Π_L) и рабочая (Π_R) производительности достигаются при $V_p = 6$ м/с: 5,93 га/л.ч и 4,76 га/ч соответственно. При этом изменчивость производительности (отношение диапазона изменения к среднему) по рабочей скорости достигает 50%, что определяет особую значимость рационального выбора технологических режимов полета МК при выполнении АХР в заданных условиях.

Наличие экстремума зависимости производительности от V_p отражает общую закономерность циклического производства АХР и определяется противоположным влиянием V_p на продолжительность полетов на гоне и заходов на них вне зависимости от наличия препятствий на границах обрабатываемого участка, его размеров и принятой схемы обработки (максимальные значения производительности для рассматриваемого случая для схем № 2 ($K_{\Pi} = 1$) и № 1 и 3 ($K_{\Pi} = 0$) достигаются при V_p 6 и 9 м/с соответственно).

Рабочая скорость МК оказывает существенное влияние не только на производительность, но и на другие значимые показатели обработок. При выполнении обработок участков с препятствиями (рис. 1b) размах необработанной перед препятствиями зоны $\Delta L_{\Pi} \sim V_p^2$. По мере роста значений V_p уменьшается коэффициент покрытия K_S , а приведенная по площади



Рис. 2. Внешний вид гексакоптера *ODONATA* (тип 2, полезная нагрузка 10 кг)

Fig. 2. The Design of the *ODONATA* hexacopter (type 2, payload 10 kg)

участка производительность обработок $\Pi_f = K_S \cdot \Pi_L$ более точно отражает приоритет выбора технологических параметров внесения веществ. В частности, для варианта $K_{\Pi} = 2$ кривая Π_f (пунктирная линия на рис. 3) указывает в качестве рациональной V_p уже 5 м/с, для которой значение Π_L уменьшается до 5,57 га/л.ч (на 6,5 %) при росте покрытия K_S примерно на 10%.

Увеличение рабочей скорости при прочих равных условиях производства АХР снижает качество внесения веществ и биологическую эффективность обработки [15]. Это обстоятельство можно учесть коэффициентом K_V , отражающим изменение результативности обработок для соответствующих режимов внесения, и использованием локального критерия оптимальности режима $\Pi_{fv} = K_V \cdot \Pi_f = K_V \cdot K_S \cdot \Pi_L$. Изменение этого критерия иллюстрирует штрих-пунктирная кривая Π_{fv} , полученная при средних показателях распределения жидкости и имеющая максимум при $V_p = 4$ м/с (рис. 3). В этом случае достигается летная и рабочая производительность на уровне 5,17 га/л.ч и 4,11 га/ч, что примерно на 15% ниже отмеченных ранее максимальных значений, однако обеспечивает приемлемый для потребителя уровень качества обработок.

Для вариантов полной обработки участков при $K_{\Pi} = 0$ (схемы № 1 и 3) поправки K_S и K_V практически не оказывают влияния на рациональную величину V_p ($\Pi_{fv} \sim \Pi_L$), а значения производительности и рациональной скорости полета обработки участка с $K_{\Pi} = 1$ («полуоткрытый участок») являются промежуточными между такими вариантами. Характерно, что для рациональных величин V_p диапазон летной производительности обработок в рассмотренном случае составляет 5,17–8,32 га/л.ч, то есть отличается в 1,6 раза, что отражает влияние на производительность МК выбранной схемы обработки заданного участка.

Отличительная особенность внесения веществ МК с электрическим приводом – влияние на показатели обработок соотношения его загрузки и емкости используемых АБ. Для рассмотренного выше варианта (рис. 3) сплошными линиями без маркеров дополнительно показано предельное число гонов, обусловленное объемом заправленной рабочей жидкости N_w , и емкость установленных АБ N_c при обработке участка для $K_{\Pi} = 2$. Как видно из этих зависимостей, при выполнении обработок с малыми нормами (5 л/га и

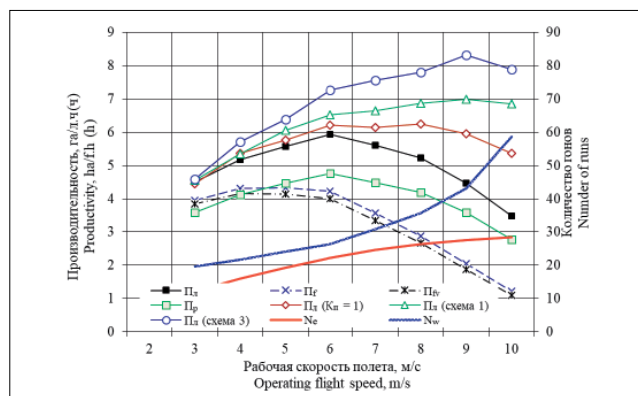


Рис. 3. Влияние рабочей скорости полета на производительность и число гонов в одном полете при обработке базовым мультикоптером квадратного участка площадью 4 га с нормой внесения 5 л/га: Π_L (Π_P) – летная (рабочая) производительность; Π_{IV} (Π_{IV}) – приведенная по площади (по площади и скорости) производительность, N_c (N_w) – предельное число гонов по емкости батарей (объему жидкости)
 Fig. 3. The impact of the operating flight speed on the performance indicators and the number of runs in one flight for the treatment of a square plot with the area of 4 ha by a base multicopter with the application rate of 5 l/ha : Π_L (Π_P) – flight (working) performance; Π_{IV} (Π_{IV}) – reduced by area (area and speed) productivity, N_c (N_w) – maximum number of runs by battery capacity (liquid volume)

менее) показатели внесения лимитируются недостаточной емкостью базового варианта АБ (16 А·ч), не позволяющей в полной мере использовать объем заправленной рабочей жидкости. Согласно расчетам, установка для этого случая более емких АБ емкостью 20 А·ч, несмотря на некоторое увеличение массы снаряженного МК и уменьшение его загрузки, приводит при неизменной рациональной V_p (4 м/с) к увеличению Π_L и Π_P до 5,32 га/л.ч и 4,22 га/ч соответственно и уменьшению себестоимости обработок примерно на 5%, что может быть использовано при подготовке и производстве МК таких видов работ.

Рассмотрим влияние технологических режимов полета МК V_p на экономические показатели АХР при себестоимости полетов C_L и обработок $C_{ГА}$ для описанных выше вариантов (рис. 4). Как видим, изменение V_p оказывает ощутимое опосредованное влияние (через годовой налет и количество полетов, требуемое количество АБ и т.д.) на себестоимость полетов МК (изменчивость C_L для схем 1 и 2 в пределах 13% при близких средних значениях около 4400 руб/л.ч, а для схемы 3 – 37% и 5120 руб/га соответственно). В свою очередь, эти показатели прямо влияют на значения $C_{ГА} = C_L/\Pi_L$, изменчивость которых по V_p составляет 29-58% при наибольшем среднем уровне (~ 920 руб/га) для варианта типовой обработки МК участка с препятствиями ($K_{П1}=2$) и примерно одинаковом среднем (745 руб/га) для остальных вариантов. Примечательно, что наименьшие значения $C_{ГА}$ для схем обработок 2 и 3 обеспечиваются при $V_p = 4-6$ м/с, определенных ранее как рациональные для обработки участка с препятствиями (рис. 4).

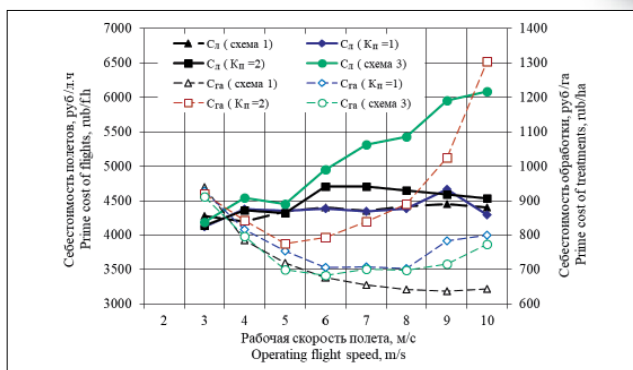


Рис. 4. Влияние рабочей скорости полета на себестоимость полетов C_L и обработок $C_{ГА}$ базовым мультикоптером квадратного участка площадью 4 га с нормой внесения 5 л/га
 Fig. 4. The impact of the operating flight speed on the prime cost of flights C_L and treatments $C_{ГА}$ of a square plot with the area of 4 ha using a basic multicopter with the application rate of 5 l/ha

При этом для вариантов с $K_{П1} = 0$ и $V_p = 9$ м/с себестоимость обработок также близка к минимальной.

Как показывают расчеты, наивысшую производительность обработки рассматриваемого участка (рис. 3) при достаточно низкой ее себестоимости (рис. 4) обеспечивает схема 3 использования МК в границах участка.

Это объясняется прежде всего полной обработкой участка ($K_S = 1$) и теоретической возможностью обработки приграничных зон участка размахом dL_B на этапах торможения и разгона МК по линии гона (рис. 1), то есть при дифференцированном внесении веществ на непостоянной, в отличие от основного режима обработки, скорости полета с использованием автоматического управления выпуском раствора. Для типовой конфигурации МК и его опрыскивателя установка такой системы сопряжена с увеличением массы конструкции, энергопотребления и стоимости мультикоптера, что приведет к усложнению и удорожанию его эксплуатации, в частности к отмеченному росту себестоимости полетов.

Автоматическое управление выпуска жидкости связано, с одной стороны, использованием гидравлического регулирования подачи, отличающегося высокой инертностью и трудностью быстрого изменения и оперативного обеспечения переменного выпуска, с другой – проблемой обеспечения дисперсности распыла жидкости и качества ее распределения по участку на переходных режимах ($dL_B \approx dL_{П1} \sim V_p^2$) [6, 7]. Эта проблема при фиксированных в полете типоразмере и количестве форсунок обусловлена необходимостью уменьшения при $V < V_p$ выпуска жидкости посредством снижения мощности привода насосного агрегата опрыскивателя и его напора, что укрупняет размер выпущенных капель и снижает плотность покрытия ими объекта обработки. Кроме того, изменение скорости полета определяет перестройку индуктивного следа за МК и волны осаждения жидкости в нем, что, как показывает опыт, ухудшает равномерность распределения веществ. Эти факторы спо-

способны существенно снизить биологическую эффективность внесения веществ, прежде всего пестицидов, в переходных приграничных зонах участка, и указанные достоинства такой схемы обработки в значительной степени нивелируются. С учетом сделанных замечаний практическое использование потенциально перспективной схемы 3 обработки участков с дифференциальным внесением веществ в их приграничных зонах до решения имеющихся технических и технологических вопросов обеспечения качества и эффективности обработок в этих зонах представляется проблематичным и далее не рассматривается.

Важнейшим технологическим параметром АХР служит норма внесения (рис. 5). График показывает достаточно очевидное и традиционное для авиационной техники ухудшение показателей обработок МК при увеличении норм внесения и соблюдении в целом соотношений показателей между разными схемами обработок (схемы 1 и 2 при $K_{П} = 0; 1$ и 2). При малых нормах внесения (до 5 л/га), обеспечивающих обработку МК более 2 га за один полет, величины $P_{Л}$, $P_{Р}$ и $C_{ГА}$ для каждой из схем принципиально не отличаются и лимитируются емкостью используемых АБ. При увеличении норм в качестве лимитирующего фактора выступает уже объем заправленной жидкости и наблюдается существенное общее падение производительности (в 1,5-2,0 раза для $P_{Л}$), и связанный с нею рост себестоимости обработок (в 2,1-2,7 раза). Характеризуя влияние нормы внесения на показатели обработок МК, следует отметить ряд особенностей:

- рост норм внесения рабочих растворов прямо связан с увеличением их выпуска. Для фиксированной полезной нагрузки МК это сопряжено с уменьшением времени собственно внесения веществ и продолжительности летного цикла при примерном постоянстве времени наземных операций. В результате относительно снижается продолжительность полета и растет соотношение между $P_{Л}$ и $P_{Р}$ (от ~ 1,2 до 2,0 в диапазоне норм 2-30 л/га), а в итоге непропорционально увеличивается время обработки заданного участка;
- для обработок с повышенными нормами важное значение имеет максимальный выпуск рабочих растворов: для рассматриваемого случая (3,2 л/мин) при нормах более 15 л/га он прямо определяет ограничения рабочей скорости внесения веществ вне зависимости от схемы обработки (для норм 20; 25 и 30 л/га – 5; 4 и 3 м/с соответственно) и практически нивелирует величины $P_{Л}$, $P_{Р}$ и $C_{ГА}$ разных схем (рис. 5).

От площади, например квадратных участков с ограничениями на границах ($K_f = 1, K_{П} = 2$), зависят производительность и себестоимость обработок рассматриваемым МК для разных норм опрыскивания (рис. 6).

Увеличение размеров и площади участков заданной конфигурации до примерно 100 га для малых и частично средних норм (5-10 л/га) в целом сопровождается улучшением значимых показателей обработок в 1,5-2,0

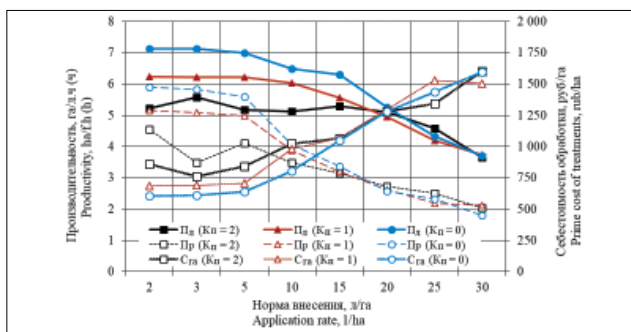


Рис. 5. Влияние нормы внесения рабочей жидкости на производительность и себестоимость обработок базовым мультикоптером квадратных участков площадью 4 га

Fig. 5. The impact of the working fluid application rate on the performance indicators and the treatment prime cost when using a basic multicopter for square plots with the area of 4 ha

раза. Этот рост в условиях отсутствия явных ограничений по объему и выпуску жидкости при обработке и возможностью выполнения более 2-3 гонов обусловлен в основном положительным влиянием на производительность удлинения гона $L_{Г}$, связанного с относительным увеличением времени внесения веществ и полетного времени для летного и рабочего цикла.

Эта особенность наблюдается и для повышенных норм – 15 и 20 л/га – при росте площадей до 50 и 24, а также при улучшении $P_{Л}$ и $C_{ГА}$, соответственно, на 50-75 и 20-30%. Для указанных норм обработка невозможна при увеличении L более 1200 и 900 м (150 и 80 га на рис. 6), как и для больших норм 25 и 30 л/га для длины участка примерно 700 м (50 га) и 600 м (36 га). Как показывают расчеты, рост площади F и длины L участка вне зависимости от схемы обработки и нормы внесения связан с увеличением рациональных величин V_p с 4-5 до 8-9 м/с, что необходимо учитывать при выборе расходных характеристик и комплектации форсунками опрыскивателя МК и технологических параметров его применения на АХР. Справочно пунктирными линиями без маркеров даны зависимости себестоимости индивидуальных обработок соответствующих участков с высокими (10 м) препятствиями на границах самолетом Ан-2 с нормами опрыскивания 5 и 25 л/га при рабочей ширине захвата 30 м (рис. 6). Из соотношения представленных на графиках зависимостей $C_{ГА}$ можно отметить конкурентоспособность себестоимости обработок рассматриваемого МК с нормами внесения 5; 10; 15 и 20 л/га самолета Ан-2 с аналогичными нормами на участках с площадью до ~ 100; 80; 50 и 36 га, что служит ориентиром при оценке возможности применения характерного МК на разных участках с учетом требуемых сроков проведения обработок.

Выводы. Разработанные и апробированные в процессе исследований методические подходы и расчетно-программные средства многофакторной оценки работы мультикоптеров по внесению рабочих растворов в аграрном производстве обеспечивают приемлемую точность и адекватность определения значимых

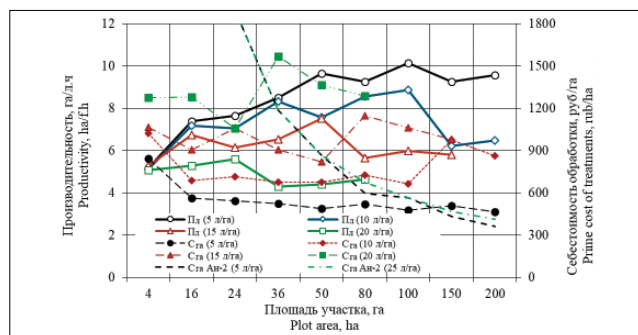


Рис. 6. Влияние площади участков с ограничениями ($K_f = 1$, $K_{II} = 2$) на показатели летной производительности и себестоимости обработок базовым мультикоптером для разных норм внесения рабочих жидкостей

Fig. 6. The impact of restricted plot area ($K_f = 1$, $K_{II} = 2$) on the flight performance indicators and the treatment prime cost for different rates of working fluid application when using a basic multicopter

показателей и могут быть использованы для решения комплекса научно-практических задач по обеспечению такими аппаратами АХР в сельском хозяйстве.

Показатели выполнения МК определенного типа работ по внесению пестицидов и агрохимикатов отличаются высокой изменчивостью (до 130%) и чувствительностью к условиям, размерам участка, схеме выполнения и технологическим параметрам обработок, что определяет необходимость обоснованного выбора рациональных вариантов оснащения мультикоптеров и схем и режимов выполнения ими полетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Marinello F., Pezzuolo A., Chiumenti A., Sartori L. Technical analysis of Unmanned Aerial Vehicles (Drones) for agricultural applications. *Engineering for rural development*. Jelgava, 25-27.05. 2016. 870-875.
2. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чашин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // *Вестник ПФИЦ*. 2019. N2. С. 47-51.
3. Мелихова е.В., Мелихов Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в аграрном производстве // *Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral»*. 2019. N3. С. 206-211.
4. Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. N3. С. 10-16.
5. Mogili U.M., Deepak B.V.V.L. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*. 2018. N133. 502-509.
6. Марченко Л.А., Артюшин А.А., Смирнов И.Г., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю., Курбанов Р.К. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N5. С. 38-45.
7. Марченко Л.А., Личман Г.И., Смирнов И.Г., Мочкова Т.В.,

При организации и подготовке работ МК по внесению пестицидов и агрохимикатов на заданные участки целесообразно с учетом имеющихся ограничений стремиться к рациональному соотношению заправки рабочих жидкостей и емкости АБ мультикоптера, обеспечению наибольшей длины гонов с преимущественно четным их количеством, выполнению обработок непосредственно с границ участка или при минимально возможном его удалении от рабочих площадок, оперативному перемещению (через 1-2 полета) рабочих площадок по мере обработки участка, а также в ряде случаев комбинированию в пределах одного участка схем его обработки. Наиболее распространенные мультикоптеры для внесения пестицидов и агрохимикатов с полезной нагрузкой около 10 кг целесообразно использовать для проведения обработок по традиционным схемам 1 и 2 участков с площадью до 50-60 га и длиной гона до 800-900 м при нормах внесения до 10 л/га. Ориентировочная в средних условиях производительность: летная – 4,0-10,5 га/л.ч, рабочая – 3,0-7,5 га/ч, дневная – 20-55 га, сезонная – 1400-3700 га. Рациональная рабочая скорость полета составляет 4-10 м/с, себестоимость обработок – 480-1050 руб/га, расчетный годовой производственный налет – 230-390 ч (1200-2600 полетов).

Схемы обработки МК участков с дифференциальным внесением веществ в их приграничных зонах потенциально обеспечивают существенное улучшение показателей обработок и перспективны для выполнения АХР с применением БВС.

8. Колесникова В.А. Дифференцированное внесение удобрений и пестицидов с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. N3. С. 17-23.
9. Свездлов С.З. О компоновке многороторного беспилотного вертолета (мультикоптера) // *Вестник Вологодского государственного университета*. 2018. N2(2). С. 20-24.
10. Арзамасцев А.А., Крючков А.А. Математические модели для инженерных расчетов летательных аппаратов мультиторного типа // *Вестник ТГУ*. 2014. Т. 19. N6. С. 1821-1828.
11. Vu N.A., Dang D.K., Dinh T.L. Electric propulsion system sizing methodology for an agriculture multicopter. *Aerospace Science and Technology*. 2019. 90. 314-326.
12. Корнилов Т.В. БПЛА – вам взлет // *Защита и карантин растений*. 2017. N5. С. 37-39.
13. Асовский В.П. Теория и практика авиационного распределения веществ. М.: Воздушный транспорт. 2008. 580 с.
14. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: ТехНОСФеРА. 2015. 312 с.
15. Вильдгубе Л.С. Вертолеты. Расчет интегральных аэродинамических характеристик и летно-технических данных. М.: Машиностроение. 1977. 152 с.
16. Асовский В.П., Кузьменко А.С. Особенности опрыскивания с использованием беспилотных воздушных судов вертолетного типа // *Защита и карантин растений*. 2019. N5. С. 40-44.

REFERENCES

1. Marinello F., Pezzuolo A., Chiumenti A., Luigi Sartori L. Technical analysis of Unmanned Aerial Vehicles (Drones) for agricultural applications. *Engineering for rural development*. Jelgava. 25-27.05.2016. 870-875 (In English).
2. Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v sel'skom khozyaystve [Use of uncleaned aircraft in agriculture] *Vestnik PFITS*. 2019. N2. 47-51 (In Russian).
3. Melikhova E.V., Melikhov D.A. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v agrarnom proizvodstve [The use of unmanned aerial vehicles in agricultural production]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologiy «Integral»*. 2019. N3. 206-211 (In Russian).
4. Smirnov I.G., Marchenko L.A., Lichman G.I., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu. Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy v sisteme tochnogo zemledeliya [Unmanned aerial vehicles for pesticides and fertilizers application in precision farming system]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. N3. 10-16 (In Russian).
5. Mogili U.M., Deepak B.B.V.L. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*. 2018. N133. 502-509 (In English).
6. Marchenko L.A., Artushin A.A., Smirnov I.G., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Tekhnologiya vneseniya pestitsidov i udobreniy bespilotnymi letatel'nymi apparatami v tsifrovom sel'skom khozyaystve [Technology of pesticide and fertilizer application with unmanned aerial vehicles in digital agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 38-45 (In Russian).
7. Marchenko L.A., Lichman G.I., Smirnov I.G., Mochkova T.V., Kolesnikova V.A. Differentsirovannoe vnesenie udobreniy i pestitsidov s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Variable rate application of fertilizers and pesticides using unmanned aerial vehicles]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. N3. 17-23 (In Russian).
8. Sverdlov S.Z. O komponovke mnogorotornogo bespilotnogo vertoleta (mul'tikoptera) [On layout design of multirotor unmanned helicopter (multicopter)]. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. N2(2). 20-24 (In Russian).
9. Arzamastsev A.A., Kryuchkov A.A. Matematicheskie modeli dlya inzhenernykh raschetov letatel'nykh apparatov mul'tirotnogo tipa (chast' 1) [Mathematical models for engineering calculations of aircrafts of multi-rotor type (part 1)]. *Vestnik TGU*. 2014. Vol. 19(6). 1821-1828 (In Russian).
10. Ngoc AnhVu, Duy KhangDang, TuanLeDinh. Electric propulsion system sizing methodology for an agriculture multicopter. *Aerospace Science and Technology*. 2019. 90. 314-326 (In English).
11. Kornilov T.B. BPLA – vam vzlet. [The UAV – take-off]. *Zashchita i karantin rasteni*. 2017. N5. 37-39 (In Russian).
12. Asovskiy V.P. Teoriya i praktika aviatsionnogo raspredeleniya veshchestv [Theory and practice of substance aviation distribution]. Moscow: Vozdushnyy transport. 2008. 580 (In Russian).
13. Rendal U. Biard, Timoti U. MakLejn Malye bespilotnye letatel'nye apparaty: teoriya i praktika [Small Unmanned Aerial Vehicles: Theory and Practice]. Moscow: TECHNOSFERA. 2015. 312 (In Russian).
14. Vil'drgube L.S. Vertolety. Raschet integral'nykh aerodinamicheskikh kharakteristik i letno-tekhnicheskikh dannykh [Helicopters. Calculation of integral aerodynamic characteristics and flight-technical data]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1977. 152 (In Russian).
15. Asovskiy V.P., Kuz'menko A.S. Osobennosti opryskivaniya s ispol'zovaniem bespilotnykh vozдушnykh sudov vertoletnogo tipa [Features of spraying with the use of unmanned aerial vehicles of helicopter type]. *Zashchita i karantin rasteni*. 2019. N5. 40-44 (In Russian).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

- Асовский В.П. – общее научное руководство, формирование программных средств и схемы расчетных исследований, анализ основных технико-технологических показателей, подготовка и доработка текста.
- Кузьменко А.С. – анализ исследований по теме, проведение основных и дополнительных многовариантных расчетов, оперативный анализ и графическое представление полученных результатов.
- Худоленко О.В. – уточнение моделей технико-экономической оценки и схемы расчетов, сравнительный анализ экономических показателей, формирование общих выводов и редактирование.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

- Asovskiy V.P. – general scientific leadership, the formation of software tools and schemes of computational studies, analysis of the main technical and technological indicators, preparation and revision of the text.
- Kuzmenko A.S. – analysis of research on the topic, carrying out basic and additional multivariate calculations, operational analysis and graphical presentation of the results.
- Khudolenko O.V. – refinement of technical and economic assessment models and calculation schemes, comparative analysis of economic indicators, formation of general conclusions and editing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

26.03.2021
03.09.2021